

# АТОМНОЕ РЕАКТОРОСТРОЕНИЕ, МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.039.517

## ТЕЧЕНИЕ И МАССОПЕРЕНОС В МАЛОСТЕРЖНЕВЫХ ПУЧКАХ ОРЕБРЕННЫХ ТВЭЛОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКЕ БРЕСТ-ОД-300

С.И. Гетья, В.Г. Крапивцев, П.В. Марков, В.И. Солонин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: en7@power.bmstu.ru; marrkov@list.ru

*Рассмотрены гидродинамические процессы и процессы переноса теплоты в моделях тепловыделяющих сборок центральной и периферийной зон реактора БРЕСТ-ОД-300. Модели состоят из 37 оребренных стержней, имеющих одинаковый описанный диаметр, но отличающихся диаметрами цилиндрических оболочек. С использованием методов вычислительной гидродинамики проведены предэкспериментальные численные расчеты течения в пучках стержней, имеющих спиральное оребрение различной геометрии, показано влияние дистанционирующего оребрения на характеристики потока. На аэродинамическом стенде выполнены эксперименты в целях определения полей скоростей в моделях тепловыделяющих сборок, интенсивности массообменных процессов, индуцированных спиральным оребрением, коэффициентов гидравлического сопротивления трения. Выполнено сравнение результатов расчетных исследований и физических экспериментов.*

**Ключевые слова:** реакторная установка БРЕСТ-ОД-300, модель ТВС, спиральное оребрение, аэродинамический эксперимент, вычислительная гидродинамика, метод теплового следа.

## FLUID FLOW AND MASS TRANSFER IN FINNED FUEL ROD ASSEMBLIES OF NUCLEAR REACTOR BREST-OD-300

S.I. Getya, V.G. Krapivtsev, P.V. Markov, V.I. Solonin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: en7@power.bmstu.ru; marrkov@list.ru

*Fluid flow and mass transfer in models of fuel rod assemblies of nuclear reactor BREST-OD-300 are analyzed. The models consist of 37 rods spaced from each other by spiral fins. Assemblies have the same step of spacing between rods, but different height of fins and diameter of cylindrical shells. Constructions of this type are offered to be used in cores of fast fission reactors. Pre-test calculations were made. Information about flow structure, mass transfer in turbulent flow of coolant was obtained by methods of computational fluid dynamics. CFD-code STAR-CCM+ was used. According to calculations, characteristics of mass transfer depend on Froude number, pressure drop coefficient depends on Reynolds number and Froude number. It is shown that secondary convection generated by spiral fins is a dominant mechanism of mass transfer. Pressure drop coefficient increases with decreasing fin step; intensity of mass transfer increases with decreasing fin step or with fin height*

*increase. Aerodynamic experiments using models of fuel rod assemblies were performed. Coolant axial velocity, temperature and pressure distributions in the models were obtained. Fluid flow was with Reynolds number from  $3 \cdot 10^4$  to  $6 \cdot 10^4$ . Pressure drop coefficients were calculated. Data of numerical and physical experiment correspond to each other.*

**Keywords:** nuclear reactor BREST-OD-300, models of fuel rod assemblies, spacing of fuel rods by spiral fins, aerodynamic experiments, computational fluid dynamics, method of heat wake.

Разработка реакторов на быстрых нейтронах нового поколения, обеспечивающих реализацию принципа естественной безопасности, требует выполнения комплексных расчетно-экспериментальных работ, направленных в том числе на обоснование теплотехнической надежности активных зон. Использование в качестве теплоносителя жидкого свинца, слабо поглощающего и замедляющего нейтроны, позволяет увеличить его долю (шаг расположения твэлов) в активной зоне по сравнению с охлаждаемыми натрием реакторами [1]. Для дистанционирования твэлов с увеличенным шагом их расположения возможно использование ребер с поперечным сечением в форме трапеции. Шаг навивки выбирают одинаковым для твэлов разного диаметра. Выравнивание подогревов свинца и температур оболочек твэлов в центральной и периферийной частях активной зоны обеспечивается использованием в этих частях твэлов разных диаметров [2].

Выполнено физическое и математическое моделирование гидродинамики и массопереноса в 37 стержневых моделях тепловыделяющих сборок (ТВС) с треугольной решеткой имитаторов твэлов на аэродинамической модели (табл. 1), размеры которой обеспечили возможность ввода в пучки между слоями стержней зондов-щупов для измерения полного напора и температуры потока. Двухзаходные ребра стержней — имитаторов твэлов — имели размеры верхнего основания трапеции 2,1 мм, нижнего — 4,3 и 3,6 мм для моделей № 1 и № 2. Во входном сечении пучка оси ребер располагались параллельно двум граням чехла. Высота оболочек имитаторов твэлов (1000 мм) соответствует 2,3 шага навивки ребер. Пучки заключены в шестигранный чехол со средним внутренним размером “под ключ” 173,5 мм. На гранях чехла выполнены отборы статического давления и прямоугольные окна (5×5 и 5×8 мм) для ввода измерительных зондов. Цилиндрические хвостовики имитаторов твэлов фиксируются в концевых опорных решетках с шагом 27,57 мм. Отверстия в решетках для теплоносителя располагались с тем же шагом и имели диаметр 12 мм. Среднеквадратические отклонения средних значений геометрических характеристик пучков стержней моделей (см. табл. 1) составили для поперечных размеров стержней 1,1 %, для шагов навивки ребер — 2,8 %.

## Геометрические характеристики моделей ТВС

Параметр	Значение
<i>Модель № 1 центральной части активной зоны</i>	
Диаметр оболочки $d$ , мм	20,81
Описанный диаметр стержня $D$ , мм	27,35
Шаг стержней $s$ , мм	27,57
Относительный шаг стержней $x = s/d$	1,325
Шаг навивки ребер $T$ , мм	438,6
<i>Модель № 2 периферийной части активной зоны</i>	
Диаметр оболочки $d$ , мм	22,58
Описанный диаметр стержня $D$ , мм	28,27
Шаг стержней $s$ , мм	28,27
Относительный шаг стержней $x = s/d$	1,252
Шаг навивки ребер $T$ , мм	444,4

Модели ТВС продувались потоком воздуха при значениях чисел Рейнольдса в диапазоне от  $3 \cdot 10^4$  до  $6 \cdot 10^4$ . Массоперенос в пучках стержней исследовали методом теплового следа. На входе в опорную решетку специальным входным устройством создавалась центральная осесимметричная слабо подогретая струя с радиусом, равным шагу решетки стержней. Скорости воздуха в основной части струи и периферийного кольцевого потока были одинаковыми. Интенсивность массопереноса оценивалась по развитию области подогретого потока в пучке имитаторов твэлов-моделей.

Полный напор и температура потока измерялись зондами-щупами с размерами поперечных сечений  $1,9 \times 3,8$  мм и  $1,5 \times 4,5$  мм для моделей № 1 и № 2. Измерения выполнялись в поперечных сечениях моделей, в которых ориентация ребер навивки образовывала свободные зоны между слоями имитаторов твэлов для движения зондов-щупов. В поперечных сечениях, расположенных на расстояниях  $T/2$  друг от друга, измерения выполнялись в шести зонах между первым и вторым, вторым и третьим, третьим и четвертым слоями твэлов (измерения вдоль граней чехла не выполнялись).

Для анализа влияния высоты ребер и шага их навивки на гидродинамику и массоперенос выполнены предварительные численные исследования течения в 37 и 7 стержневых пучках с относительными шагами расположения стержней  $s/d = 1,325$  и  $1,224$ . Стержни дистанционированы двухзаходным оребрением с ребрами модельных размеров и шагами их навивки  $T/d$  в диапазоне от 18,6 до 40,4. В численных исследованиях использованы осредненные уравнения движения турбулентного потока, замыкаемые квадратичной  $(k-\varepsilon)$ -моделью турбулентности [3]. Перенос теплоты описывался в приближении модели

пассивного скаляра:

$$\sum_j V_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right], \quad (1)$$

где  $V_j$  — проекция вектора осредненной скорости в направлении  $x_j$ ;  $T$  — осредненная температура потока;  $\nu$ ,  $\nu_T$  — молекулярная и турбулентная вязкости;  $Pr$ ,  $Pr_T$  — молекулярное и турбулентное числа Прандтля.

Турбулентное число Прандтля принималось равным 0,9. Турбулентная вязкость определялась из уравнений сохранения количества движения по выражению

$$\nu_T = C_v \cdot \frac{k^2}{\varepsilon},$$

где коэффициент  $C_v$  определяется параметрами осредненного течения и в условиях расчета имеет порядок  $C_v \sim 0,1$ .

Численные исследования выполнены в программном комплексе STAR-CCM+ [4]. Граничные условия на входе в модель включали в себя задание равномерного распределения продольной скорости в пространстве между стержнями (концевые опорные решетки не моделировались) и “горячего” пятна в форме ступенчатого изменения температуры на радиусе, равном шагу расположения стержней (температура потока в горячем пятне на  $25^\circ\text{C}$  выше, чем на периферии). Граничное условие на выходе из модели — постоянство статического давления в сечении.

Согласно результатам численных исследований, стабилизированное значение КГС трения моделей с предельным отклонением 4% аппроксимируется следующей зависимостью:

$$\lambda = 0,316 Re^{-0,25} (1 + 41,8 Fr^{-0,8}), \quad (2)$$

где  $Fr = T^2/sd_t$  — число Фруда течения в пучке оребренных стержней, которое характеризует отношение сил инерции потока к центробежным силам, генерируемым оребрением [5].

Зависимость (2) обобщает данные для 37 и 7 стержневых пучков с  $T/d$  от 10,1 до 40,4, относительными шагами стержней 1,325 и 1,224, что соответствует значениям  $Fr = 102 \dots 2056$  в диапазоне  $Re = 1,6 \cdot 10^4 \dots 12,5 \cdot 10^4$ . Важно отметить, что в числах Рейнольдса и Фруда использован гидравлический диаметр бесконечной решетки оребренных стержней  $d_t$ . Коэффициент гидравлического сопротивления трения рассчитан по градиенту среднего в поперечном сечении моделей статического давления  $\frac{d\bar{p}}{dz}$ , гидравлическому диаметру моделей  $d_{TM}$  и скоростному напору, определенному по среднерасходной

скорости потока  $\bar{w}$ :

$$\lambda \frac{1}{d_{\text{TM}}} \frac{\rho \bar{w}^2}{2} = \frac{d\bar{p}}{dz}. \quad (3)$$

Использование указанных определяющих параметров в численных расчетах и в экспериментах дает лучшую аппроксимацию результатов по сравнению с другими возможными.

Экспериментальные значения стабилизированных КГС трения в моделях ТВС, полученные по аппроксимациям измерений статического давления на двух смежных гранях чехла, приведены в табл. 2. Погрешности экспериментального определения КГС составили 6...8%. Значительный вклад в погрешности вносят неопределенности геометрических размеров моделей, в первую очередь чехла.

Таблица 2

### Значения КГС трения

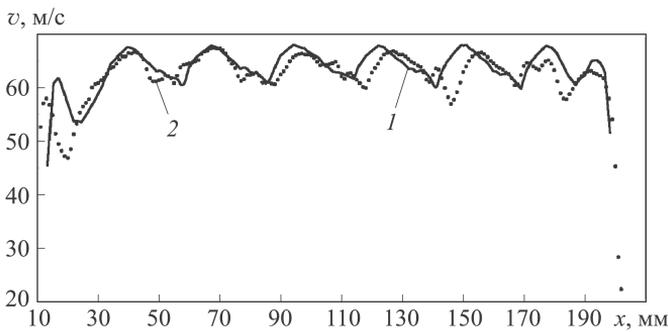
Модель № 1 центральной части активной зоны					
Re	$5,79 \cdot 10^4$	$5,16 \cdot 10^4$	$4,47 \cdot 10^4$	$3,81 \cdot 10^4$	$3,13 \cdot 10^4$
Эксперимент	0,0247	0,0253	0,0261	0,0273	0,0279
Расчет по (2)	0,0269	0,0276	0,0287	0,0298	0,0313
Отклонение, %	-8,7	-9,3	-9,8	-9,2	-12,3
Модель № 2 периферийной части активной зоны					
Re	$6,06 \cdot 10^4$	$5,56 \cdot 10^4$	$4,87 \cdot 10^4$	$4,18 \cdot 10^4$	$3,33 \cdot 10^4$
Эксперимент	0,0267	0,0269	0,0278	0,0285	0,0293
Расчет по (2)	0,0259	0,0264	0,0273	0,0284	0,0301
Отклонение, %	3,1	1,7	1,7	0,3	-2,6

Данные табл. 2 могут быть представлены в виде  $\lambda_{\text{ц}} = 0,379 \text{ Re}^{-0,25} \pm \pm 2\%$ ,  $\lambda_{\text{п}} = 0,410 \text{ Re}^{-0,25} \pm \pm 3\%$ , где  $\lambda_{\text{ц}}$  и  $\lambda_{\text{п}}$  — коэффициенты сопротивления трения моделей центральной и периферийной частей активной зоны.

Сравнение результатов экспериментов с зависимостью (2) дает среднеквадратическое отклонение 9,9% для модели № 1 и 2,1% для модели № 2 при предельных отклонениях 12,3% и 3,1% соответственно.

Отметим, что расчетное значение коэффициента гидравлического сопротивления трения пучка гладких стержней, расположенных с относительным шагом 1,325, при числе Рейнольдса  $7,3 \cdot 10^4$  составляет 0,0211 и на 3% меньше значения, полученного по эмпирической корреляции ФЭИ [6].

Экспериментальное и расчетное распределения продольной скорости потока вдоль осевой линии зазора между первым (проходящим через ось моделей) и вторым слоями имитаторов твэлов приведены на



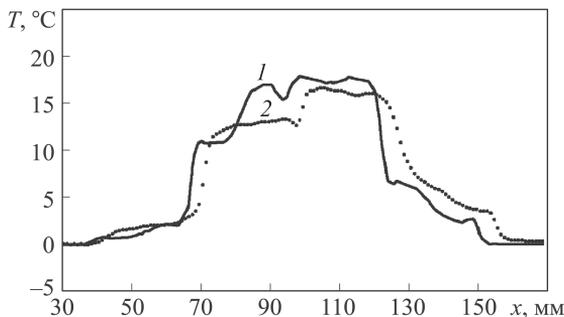
**Рис. 1. Распределение средней продольной скорости потока между первым и вторым рядами имитаторов твэлов в модели № 1 на удалении одного шага навивки от входа:**

1 — эксперимент; 2 — расчет

рис. 1. Данные приведены для расстояния одного шага навивки от входа, где распределения скорости становятся квазистабильными. Отметим, что распределения продольных скоростей в диагностируемых областях близки по значениям и характеру изменения для всех регулярных ячеек. Для периферийных ячеек скорости потока уменьшаются. Экспериментальные и расчетные значения скоростей в большей части области течения близки. Различия связываются с отклонением реальной геометрии тракта (эксперимент) от использованной в расчетах (номинальные размеры моделей).

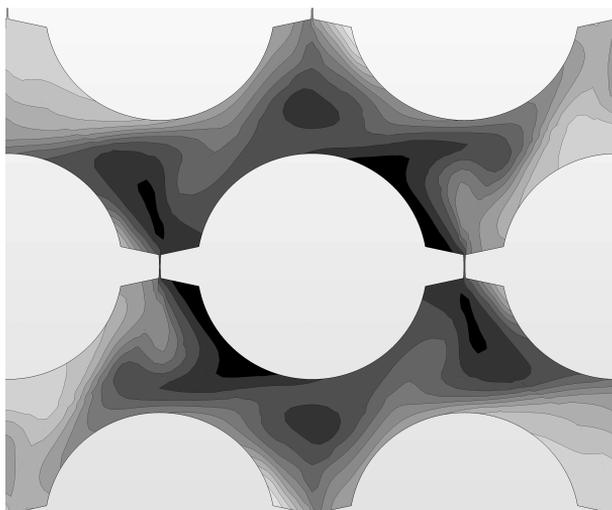
Экспериментальное и расчетное распределения превышения температуры в центральной струе над температурой периферийного потока приведены на рис. 2 для условий, совпадающих с представленными на рис. 1.

Результаты экспериментального исследования количественно и качественно соответствуют результатам расчетов с использованием ПК STAR-CCM+. Различие расчетных и экспериментальных распределений температур связано как с разными геометриями реального и мо-



**Рис. 2. Распределение превышения температуры потока между первым и вторым рядами имитаторов твэлов в модели № 1 на удалении одного шага навивки от входа:**

1 — эксперимент; 2 — расчет



**Рис. 3.** Деформация температурной неоднородности радиуса, равного шагу решетки стержней, на удалении одного шага навивки от входа (темный цвет соответствует более высокой температуре)

дельного течений, так и с отклонениями принятых в расчетах граничных условий на входе в модели от реальных, определяемых теплообменом между центральной струей и периферийным потоком.

Следует отметить, что распределения температуры не обладают симметрией по отношению к геометрии пучка, что связано с конвекцией, индуцируемой оребрением. Область распространения подогретого потока по поперечному сечению модели (см. рис. 2) достигает ячеек между вторым и третьим рядами стержней.

Особенности массопереноса в пучке оребренных имитаторов твэлов иллюстрирует рис. 3 (результаты расчета). Индуцируемое ребрами тангенциальное течение определяет отсутствие тангенциальной симметрии распределения температуры в окрестности центрального стержня, различие в температурных распределениях в ячейках пучка. По периметру оребренного стержня формируются три характерных распределения. Наиболее высокие температуры сохраняются на части цилиндрической поверхности стержня, прилегающей к ребрам с наветренной стороны. Распределение температуры в ячейках вокруг стержня является центрально симметричным.

Структурные характеристики течения и массообмена, полученные для моделей № 1 и № 2, близки между собой. Интегральные эффекты массообмена для моделей различны: увеличение высоты ребер интенсифицирует массоперенос в пучке. Так, согласно расчетам для пучков с  $s/d = 1,325$  и  $s/d = 1,224$  максимальная избыточная температура в потоке уменьшается на расстоянии  $T/s = 15,2$  на 46 и 37%. Согласно расчетам в гладкостержневом пучке с относительным шагом 1,325 на том же расстоянии избыточная температура уменьшается на 9%.

Приведенные данные согласуются с результатами экспериментов. Полученные результаты свидетельствуют о важной роли конвективного переноса в межячейковом обмене количеством движения и теплотой.

Из результатов экспериментов и расчетов следует, что в сборках с оребренными твэлами рассмотренной геометрии течение и массоперенос определяются взаимодействием процессов конвективного и диффузионного обменов. Распределению температуры в области регулярных ячеек присуща существенная неоднородность, связанная с влиянием конвективного переноса потока ребрами и недостаточной интенсивностью турбулентной диффузии. Указанную особенность следует учитывать при разработке моделей поячейкового расчета сборок с оребренными твэлами, добиваясь адекватного описания условий теплового взаимодействия потока с твэлами и ТВС. Применение CFD-кодов, накопление новых экспериментальных данных о течении и массообмене в ТВС с оребренными твэлами являются основой для создания методик их поячейковых расчетов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Драгунов Ю.Г., Лемехов В.В., Смирнов В.С. Технические решения и этапы разработки реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 // Атомная энергия. 2012. Т. 113. № 1 С. 58–64.
2. Адамов Е.О., Драгунов Ю.Г., Орлов В.В. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV. С. 25. Машиностроение ядерной техники. Кн. 1. М.: Машиностроение, 2005. С. 667–672.
3. Моделирование температурных неоднородностей в пучке твэлов ТВС ВВЭР-1000 / С.И. Гетья, В.Г. Крапивцев, П.В. Марков и др. // Атомная энергия. 2013. Т. 114. № 1. С. 55–57.
4. STAR-CCM+, version 7.06. UserGuide (руководство пользователя), CD-adapco Group, 2012.
5. Давыдов Ю.И., Дзюбенко Б.В., Дрейцер Г.А. Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.
6. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам: Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы. М.: Энергоатомиздат, 1990. 360 с.

## REFERENCES

- [1] Dragunov Yu.G., Lemekhov V.V., Smirnov V.S. Technical solutions and development stages for the BREST-OD-300 reactor unit. *Atomic Energy*, 2012, vol. 113, no. 1, pp. 70–77.
- [2] Adamov E.O., Dragunov Yu.G., Orlov V.V. Mashinostroenie. Entsiklopediya. T. IV. S. 25. Mashinostroenie yadernoy tekhniki. Kn. 1 [Nuclear engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, pp. 667–672.
- [3] Getya S.I., Krapivtsev V.G., Markov P.V., Solonin V.I., Tsirin S.I. Modeling temperature nonuniformities in a fuel-element bundle of a VVER-1000 fuel-assembly. *Atomic Energy*. 2013, vol. 114, no. 1, pp. 69–72.
- [4] STAR-CCM+, version 7.06. User Guide, CD-adapco Group, 2012.

- [5] Davydov Yu.I., Dzyubenko B.V., Dreytser G.A. Teploobmen i gidrodinamika v kanalakh slozhnoy formy [Heat transfer and hydrodynamics in channels of complicated configuration]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 200 p.
- [6] Kirillov P.L., Yur'ev Yu.S., Bobkov V.P. Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam: Yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory [Reference book of thermal and hydraulic calculations: Nuclear reactors, heat exchangers, steam generators]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 360 p.

Статья поступила в редакцию 30.09.2014

Гетья Сергей Иванович — ведущий электроник кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 12 научных работ в области ядерных технологий, физического моделирования.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Getya S.I. — Leading researcher of “Nuclear reactors and plants” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 12 publications in the field of nuclear engineering, physical modeling.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Крапивцев Вениамин Григорьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 25 научных работ в области ядерных технологий.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Krapivtsev V.G. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Nuclear reactors and plants” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 25 publications in the field of nuclear engineering.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Марков Павел Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 22 научных работ в области ядерных технологий, вычислительной гидродинамики.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Markov P.V. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Nuclear reactors and plants” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 22 publications in the field of nuclear engineering, computational hydrodynamics.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Солонин Владимир Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Ядерные реакторы и установки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области ядерных технологий.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Solonin V.I. — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Nuclear reactors and plants” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of nuclear engineering.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.